

УДК 550.3

ОСОБЕННОСТИ ДВИЖЕНИЯ ГЕОГРАФИЧЕСКОГО СЕВЕРНОГО ПОЛЮСА ЗЕМЛИ И СКАЧКИ В ГЕОМАГНИТНОМ ПОЛЕ

© 2022 г. А. Е. Вольвач¹ *, Г. С. Курбасова¹, Л. Н. Вольвач¹, А. В. Ипатов²

¹Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Крым, Россия

²Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург, Россия

*volvach@bk.ru

Поступила в редакцию 26.07.2021 г.

После доработки 31.12.2021 г.

Принята к публикации 11.03.2022 г.

Приведены результаты анализа и сопоставления моментов появления особенностей долговременного смещения по поверхности Земли географического Северного полюса, компонентов углового момента атмосферы и глобальных джерков в геомагнитном поле. В расчетах использовались многолетние данные о движении Северного географического полюса с интервалами между отсчетами 0.05 лет, данные о компонентах углового момента атмосферы, и информация о появлении глобальных джерков, наблюдаемых на всех магнитных обсерваториях земного шара. В работе использовались методы: вейвлет анализа, приближения нелинейных трендов гладкими функциями, двухканальный спектральный анализ. По результатам анализа сделан вывод о возможной связи особенностей в нелинейных трендах движения географического Северного полюса по поверхности Земли, компонентов углового момента атмосферы, а также глобальных джерков в вековых вариациях геомагнитного поля на интервале 1964–1980 гг. с глобальными энергетическими перестройками в соприкасающихся оболочках системы Земля. Установлена когерентность между вариациями с периодом 35.3 г. в данных об изменении положения Северного полюса относительно условного начала и в данных об изменении дипольного момента. Допускается возможность процесса их синхронизации с опережением на 6 лет колебаний в данных об изменении дипольного момента.

DOI: 10.31857/S0023420622040082

ВВЕДЕНИЕ

Смещение полюсов изменяет географические координаты мест на земной поверхности, влияет на определение времени и затрагивает целый ряд задач астрономии, геодезии, геофизики, климатологии [1, 2]. Для понимания влияния активности звезд на (экзо-) планетные системы мы можем рассматривать Солнце и планетную систему в качестве наиболее близкой и наиболее изученной космической лаборатории и исследовать солнечно-планетные связи в ней.

Вращение Земли и движение ее полюсов характеризуется сложным процессом изменения ориентации в системе Солнце–Земля–Луна. Возбуждение этих изменений и их геофизические последствия в самых разных областях не полностью изучены и являются предметом исследований в настоящее время [1, 3, 4].

Одной из неизученных проблем является изменение ориентации движения Северного среднего географического полюса по поверхности Земли, появление точек возврата на графиках полудий – проекций координат полюса на плоскость.

Генерация геомагнитного поля с существующей напряженностью не могла бы происходить без вращения Земли. Связь вращения Земли и геомагнитного поля обсуждается в ряде публикаций [3, 5–7].

Так, например, в работе [5] изменения в геомагнитном поле на десятилетних интервалах времени предполагается подобным равномерному движению жидкости в форме цилиндров, расположенных концентрически относительно оси вращения Земли. Эти изменения, поскольку они однородны по всему ядру, можно описать с помощью модели поверхностного потока, рассчитанного по вековому ходу геомагнитного поля. Сравнение этих изменений с изменениями вращения твердой Земли (изменение длительности суток) обнаруживает поразительное согласие.

На фоне долголетних гладких изменений в геомагнитном поле наблюдаются джерки – быстрые изменения магнитного поля во времени. В настоящее время происхождению этих изменений посвящено большое количество публикаций. В большинстве работ обсуждается их внутри земное происхождение. Информация о одновременности джерков используется с целью изучения электропроводности мантии [8].

В последнее время появились работы, в которых обсуждается связь появления геомагнитных джерков с ускоренным смещением Северного магнитного полюса [9, 10]. Возможность такой связи трудно доказать без знания причин, побуждающих магнитный полюс двигаться ускоренно и происхождения конкретных джерков. Глобальных же джерков, наблюдаемых на магнитных обсерваториях всего Земного шара, ограниченное количество (3–4) и их связь с магнитными аномалиями не доказана. Тем не менее, информация о распределении локальных джерков по поверхности Земли может способствовать установлению достоверности этой связи. В смещении Северного (по полярности – южного) геомагнитного полюса нет ничего особенного. Небольшое различие в смещении Северного и Южного геомагнитных полюсов можно объяснить асимметрией тела Земли. Даже медленное разрушение дипольного поля (пока еще не обоснованное в рамках существующей модели генерации геомагнитного поля) не вызывает таких неоднозначных объяснений как ускоренное смещение Северного магнитного полюса. Многочисленные публикации о катастрофических изменениях локальных климатических условий в связи со смещением магнитного полюса не имеют научного обоснования. Локальные, как и глобальные аномалии в формировании климата зависят от множества геофизических и космических факторов. Локальные изменения магнитного поля на территории России имели место и в древние времена. Приведем пример из монографии Е.П. Борисенкова и В.М. Пасецкого “Экстремальные природные явления в русских летописях XI–XVII”: “919 г., Киевская Русь, Византия. Полярное сияние: “сея зимы погоре небо и столпы огненные ходили от Руси по Греции”.

Процессы, происходящие в магнитном поле Земли: снижение мощности дипольной части, западный дрейф недипольной части, изменения в локальных недипольных частях не находят однозначного объяснения в рамках современной теории. В этом случае могут быть полезными экспериментальные исследования, которые проводятся научным сообществом. Связь вращения Земли с геомагнитным полем позволяет предположить, что одни и те же глобальные процессы, которые влияют на вращение Земли, влияют и на геомагнитное поле. В связи с этим основной целью настоящей работы является сопоставление времени появления глобальных джерков в параметрах геомагнитного поля и особенностей в долговременном движении Северного географического полюса Земли.

ДАННЫЕ ДЛЯ АНАЛИЗА

Координаты среднего полюса Земли вычисляются по моделям IERS. При этом модели гравитационного поля включают в себя коэффициенты

тессеральных гармоник C21 и S21. Эти параметры описывают положение оси фигуры Земли относительно наземной системы координат. Ось должна совпадать с наблюдаемым положением полюса вращения Земли, усредненным за тот же период времени. На среднее движение полюса влияет долговременный дрейф на запад (в направлении 70.7° на запад, скорость: 4.2 мс/г.). Средняя ось вращения относительно наземной системы отсчета IERS может рассматриваться как нелинейный долговременный тренд, полученный после фильтрации сезонных составляющих и колебания Чандлера.

В настоящей работе для анализа использовались временные ряды координат полюса x , y (IERS) C01 в системе IERS 1997 г. с интервалом отсчетов 0.05 г. за период с 1.I.1900 по 25.IX.2021 [11–14].

Эта серия является основой системы IERS для долгосрочных исследований. Она регулярно обновляется один раз в месяц и охватывает последний интервал в 0.05 г. Таблица используемых нами данных расположена на сайте <https://hpiers.obspm.fr/iers/eop/eopc01/eopc01.1900-now.dat>. В анализе использовался временной ряд расстояний от условного начала $R = \sqrt{(x^2 + y^2)}$.

С целью сопоставления нерегулярностей в различных сферах системы Земля использовались данные о компонентах углового момента атмосферы (ААМ), определенные в результате оперативного анализа Европейского центра прогноза погоды среднего радиуса действия (ECMWF) и публикуемые службой IERS [15].

Кроме того, использовались данные об изменении геомагнитного диполя [<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/poles/polesexp.html>] с интервалами отсчетов 5 лет за период 1900–2015 гг. и после 2015 г. – интервалы отсчетов 1 г. Для сравнения использовались результаты анализа наблюдений геомагнитных джерков из работы [8].

ВЕКОВОЙ ХОД ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ И ГЛОБАЛЬНЫЕ ДЖЕРКИ

Геомагнитное поле, измеренное в любой точке земной поверхности, является совокупностью нескольких магнитных полей, генерируемых различными источниками. Эти поля накладываются и взаимодействуют друг с другом. Более чем 90% измеряемого поля генерируется внутри планеты и в земной коре. Эта часть геомагнитного поля часто называется главным магнитным полем. Главное магнитное поле изменяется медленно во времени и может быть описано такими математическими моделями как (IGRF) – международная геомагнитная рекомендуемая модель, (WMM) – Глобальная магнитная модель [16].

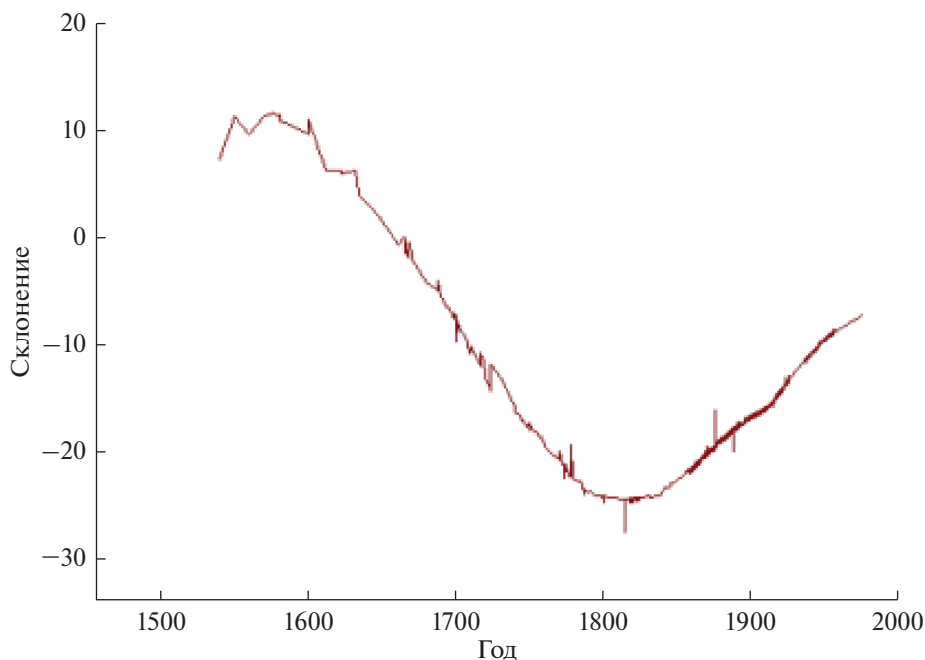


Рис. 1. Изменение склонения магнитного поля D в Лондоне (https://geomag.nrcan.gc.ca/mag_fld/sec-en.php).

Международная ассоциация геомагнетизма и аэронавтики (IAGA) в 2014 г. выпустила Международное геомагнитное контрольное поле 12-го поколения – новейшую версию стандартного математического описания основного магнитного поля Земли, широко используемого при изучении глубинных процессов Земли, ее коры, ионосферы и магнитосферы. В создании этой модели принимали участие русские ученые и использовались магнитные измерения, полученные в РФ.

Магнитное поле Земли постепенно меняется в масштабах времени от нескольких лет до тысячелетий. Такие изменения называются вековыми вариациями. Наблюдения склонения в Лондоне на протяжении многих лет является одной из лучших демонстраций изменения вековых вариаций (см. рис. 1). На рисунке показано, что склонение изменилось примерно с 10° в.д. в конце XVI в. до 25° з.д. в начале XIX в., прежде чем вернуться к текущему значению примерно 3° з.д.

Со временем меняются все элементы магнитного поля – не только склонение. Например, общая интенсивность в Торонто снизилась на 14%, с примерно 64000 до 55000 нТл за последние 160 лет (https://geomag.nrcan.gc.ca/mag_fld/sec-en.php). Основные процессы, изменяющие вековые вариации, состоят в уменьшении напряженности дипольной части магнитного поля, западном дрейфе в недипольной части магнитного поля и изменении (распад и восстановление) не дрейфующей части недипольного поля.

Вековой ход геомагнитного поля не только медленно меняется, но и склонен к кратковре-

менным джеркам – сравнительно резким изменениям скорости векового хода одного или нескольких параметров геомагнитного поля. Это явление впервые открыли французские исследователи [16–19]. Они заметили, что на многих магнитных обсерваториях тенденция векового хода до 1969 г. заметно отличается от тенденции после 1969 г. Данная особенность, наиболее заметная в восточной составляющей магнитного поля на европейских обсерваториях, наблюдалась на многих обсерваториях мира. С геомагнитным джерком 1969–1970 гг., геофизики связывают ускоренное смещение по поверхности Земли Северного магнитного полюса [16].

Самые явные, наблюдаемые во всем мире джерки, произошли в 1969, 1978, 1991 и 1999 гг. Сведения о джерках до 1969 г. недостаточно точны.

В работе [8] приведен анализ наиболее известных глобальных джерков, наблюдаемых на магнитных обсерваториях Земного шара (см. рис. 2). Для анализа использовались различные наборы данных: среднегодовые значения, средние 12-месячные, средние значения среднемесячных значений обсерваторий в повернутых геомагнитных дипольных координатах и данные, представляющие вклад поля ядра, синтезированные из модели поля SM4, зависящей от времени.

В результате этого анализа были обнаружены глобальные джерки векового хода геомагнитного поля в 1969, 1978 и 1991 гг., полученные из годовых значений. В то же время, джерки в 1999 и 2005 гг. были обнаружены только локально.

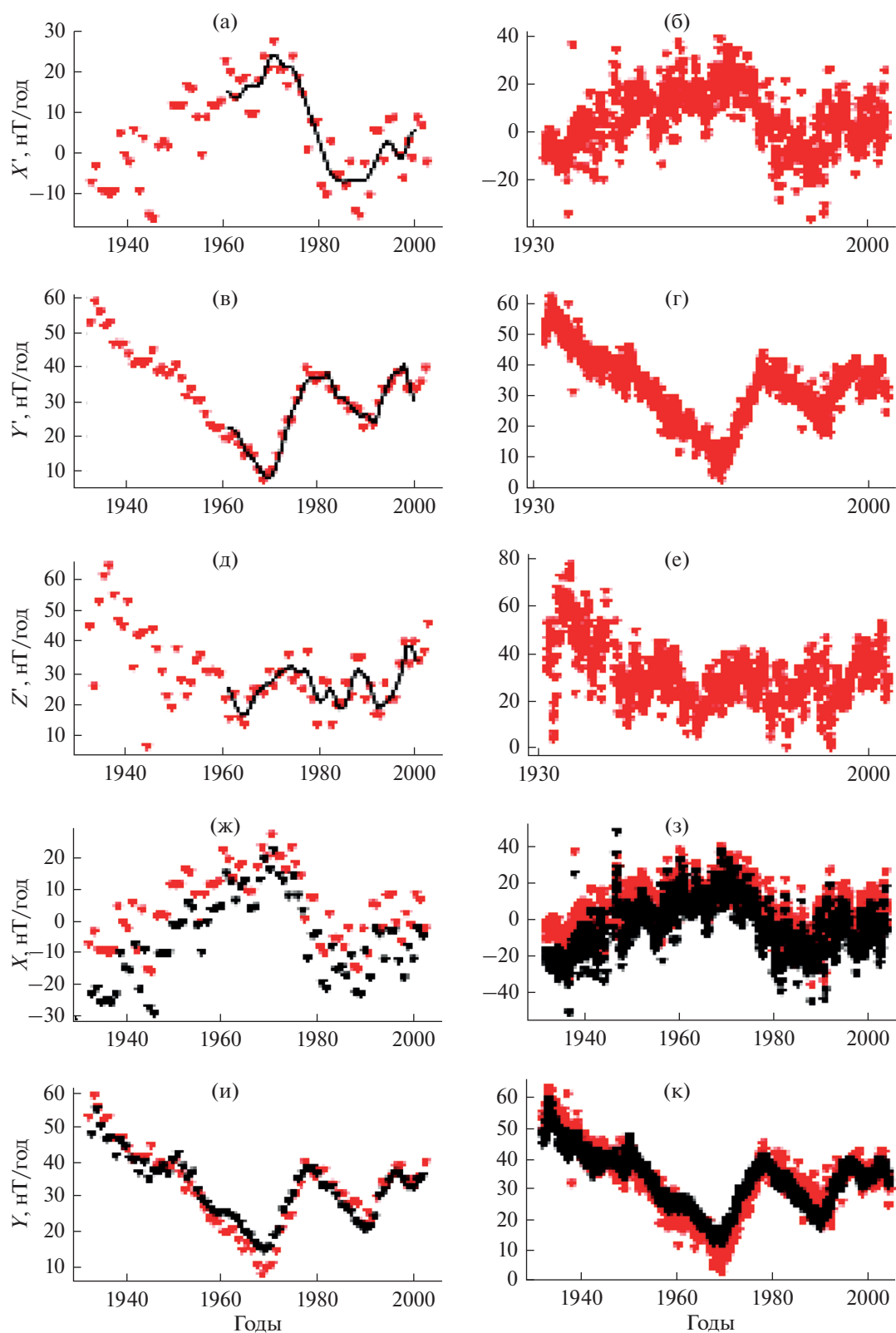


Рис. 2. Оценки вековых вариаций для компонент X , Y и Z магнитного поля с использованием различных наборов данных в Обсерватории Niemegek (Германия) [8].

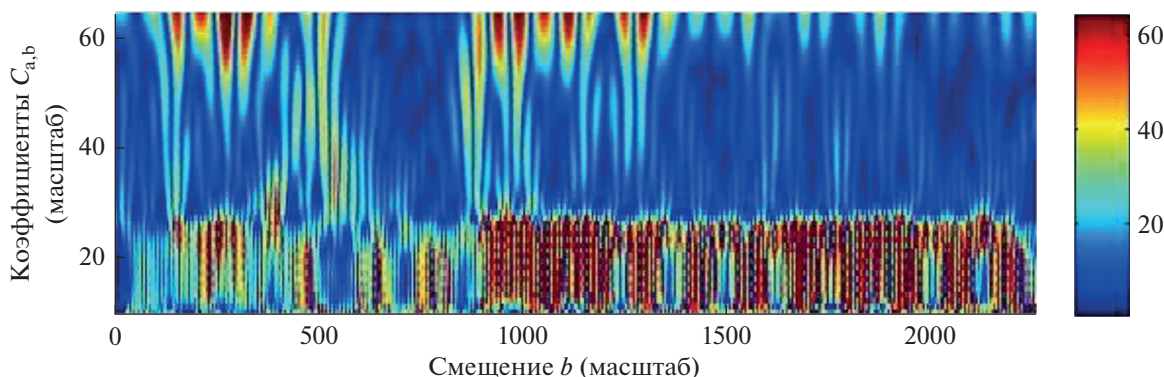


Рис. 3. Непрерывное вейвлет-преобразование данных R .

ДОЛГОВРЕМЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ СРЕДНЕГО ПОЛЮСА ЗЕМЛИ

Долговременные вариации в движении Земли и ее геомагнитного поля отличаются большой регулярностью и могут быть описаны гладкими функциями. В то же время, кратковременные отклонения от гладкой долговременной траектории и возврат на тот же (или другой) уровень сопровождается появлением точек возврата [20], в которых первая производная обращается в нуль. Причины появления точек возврата на графике долговременного тренда географического полюса Земли в настоящее время является предметом научных дискуссий. Точки возврата на графиках долговременных трендов с последующим изменением режима колебания служат показателем момента энергетической перестройки в системе, порождающей этот процесс.

РЕЗУЛЬТАТЫ и ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ картины вейвлет-преобразования на рис. 3 обнаруживает не стационарность процесса изменения данных R . Так как коэффициенты C_{ab} представляют информацию об изменении спектрального состава при смещении по оси времени (b), то можно оценить какому моменту времени соответствует изменение спектра. Индикатор цвета указывает на изменение интенсивности колебаний (см. рис. 3, шкала цвета). Кроме того, состав частот в структуре данных демонстрируют величины коэффициентов аппроксимации C_{ab} (большим величинам соответствуют низкочастотные колебания). Присутствие в спектре данных низкочастотной компоненты очевидно (см. рис. 3).

Так как мы анализируем долговременную эволюцию процесса смещения полюса Земли, была проведена фильтрация с целью удаления высоких частот,

Возможность удаления наиболее мощных высокочастотных изменений в данных R реализована нами с помощью вейвлет аппроксимации. Поэтапное освобождение данных от высокочастот-

ных колебаний достаточно наглядно показано на рис. 4: вейвлет аппроксимация уже на седьмом уровне преобразования a_7 показывает характер изменения долговременного тренда, выделяя высокочастотную часть сигнала в коэффициенты детализации d_i .

Графики серии данных R и долговременный тренд приведены на рис. 5а. Анализ отфильтрованной части спектра (см. рис. 5б) показал, что из исходной серии данных R удалены высокочастотные колебания.

Математическое описание долговременного тренда в данных R . Для анализа выделенного долговременного тренда нами построена численная модель:

$$f(dt) = a_0 + \sum_{i=1}^n (a_i \cos(istw) + b_i (\sin(idtw))), \quad (1)$$

где dt – временной интервал, отсчитываемый в годах от начала моделируемого временного ряда, n – порядок модели. Коэффициент a_0 моделирует постоянный член в данных, w – основная частота.

Оптимальный порядок модели долговременного тренда равен 8, точность приближения (RMSE = 0.0018, R -квадрат = 0.999) указывают на то, что практически вся дисперсия учитывается моделью (1).

Графический анализ. На рис. 6 приведены графики долговременного тренда в данных R (модель 1) и график изменений во времени дипольного момента (http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/poles/figs/pole_ns.tab). Наблюдаемые на рис. 6 противоположные тенденции в изменениях двух серий данных – экспериментально установленный факт на ограниченном интервале времени, который требует теоретического обоснования при уточнении теории долговременной генерации главного магнитного поля и долговременного движения полюса Земли.

Так как Земля не изолированное тело, переходные процессы в ее вращении должны наблюдаться во всех оболочках системы Земля и, в

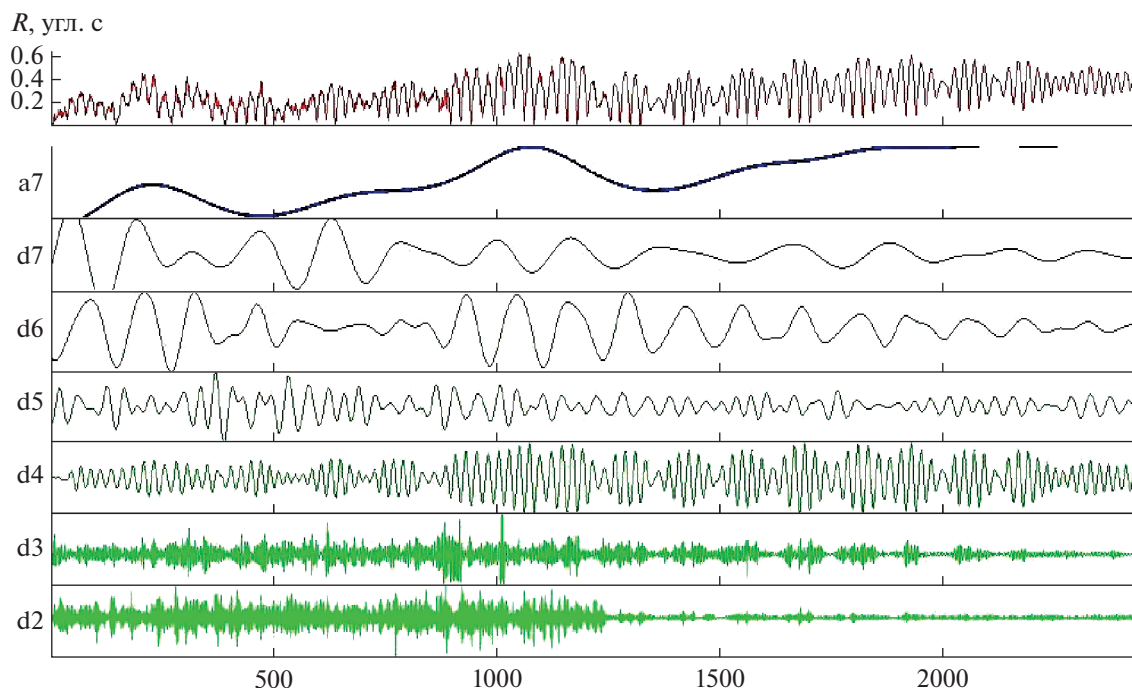


Рис. 4. Вейвлет аппроксимация данных до седьмого уровня преобразования. Вейвлеты “dmey”. По горизонтальной оси графика R – отсчеты временных интервалов длительностью 0.05 г. от 1900 г.; по вертикальной – угловые секунды.

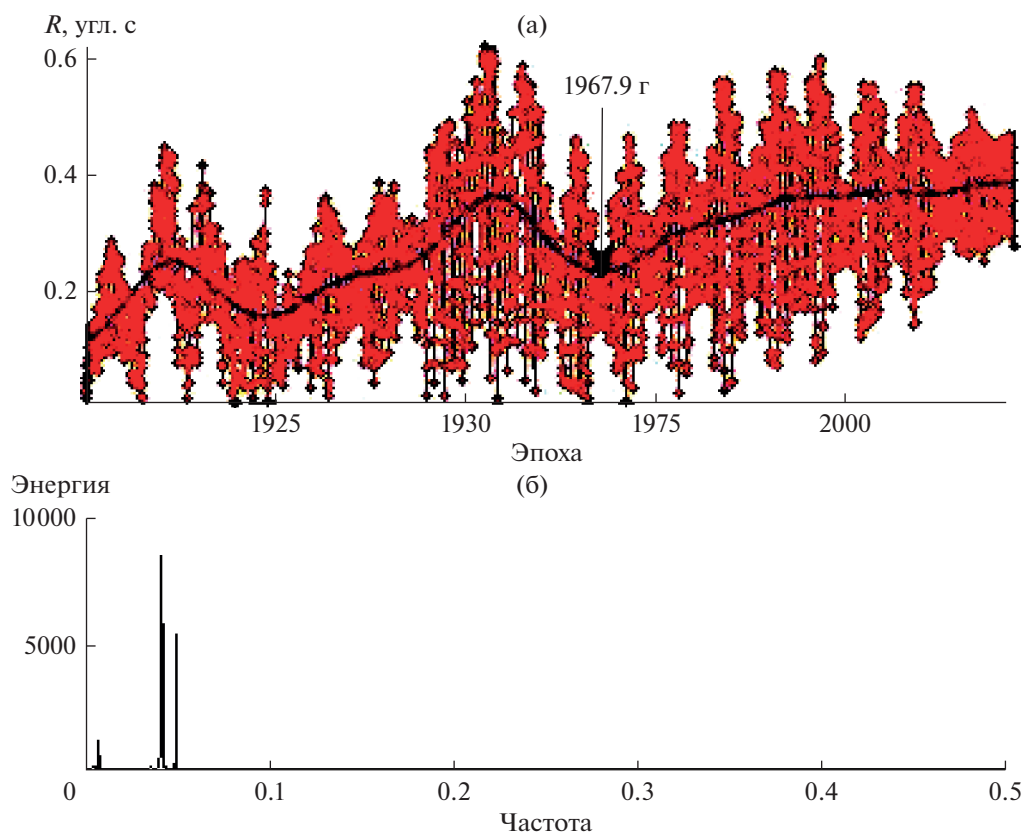


Рис. 5. а – исходные данные R (красные звезды) и сплошная линия – тренд; б – спектр отфильтрованных высокочастотных колебаний в данных R .

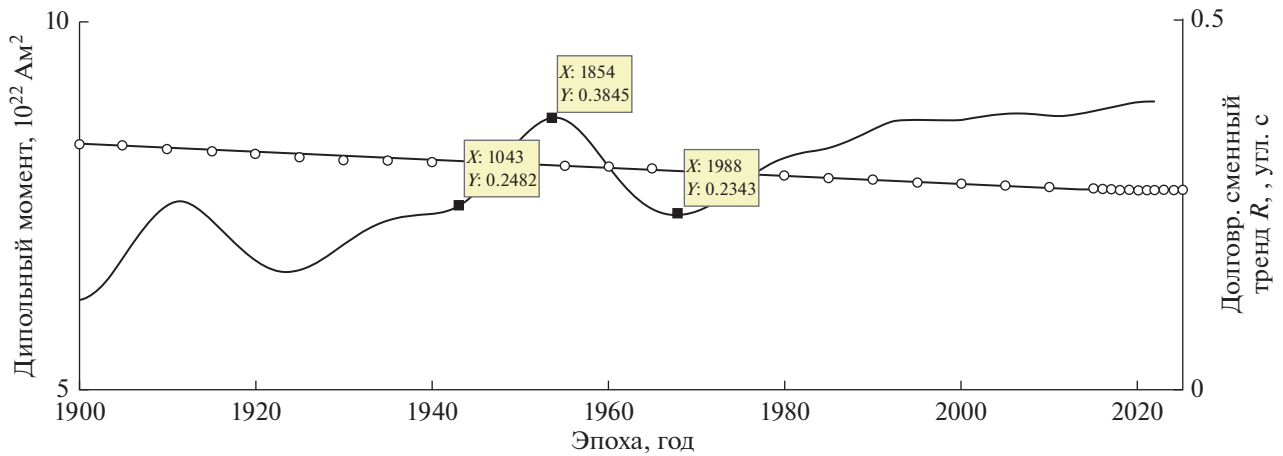


Рис. 6. График долговременного тренда (непрерывная линия); график данных о дипольном моменте (кружки).

первую очередь, в атмосфере. Связь процессов в атмосфере с вращением Земли не подлежит сомнению. Сопоставление долговременных трендов указывает на согласованность этих процессов.

На рис. 7 приведены среднегодовые данные об изменениях компонент X, Y, Z углового момента атмосферы и выделенные по описанной выше методике долговременные тренды.

Между процессами в различных оболочках системы Земля возможна синхронизация внутренних и внешних механических движений, и воспроизводимых ими событий. Поэтому выявление когерентных вариаций между внутриземными процессами и параметрами ориентации Земли позволяет получить информацию о частотах, на которых возможна синхронизация. Для установления когерентных вариаций между данными о дипольном моменте DIP и данными о долговременном тренде R (см. рис. 6) нами использовался метод оценки спектральной плотности мощности (СПМ).

В анализе когерентных связей использовался метод спектральных оценок, обладающих высокой разрешающей способностью для ограниченных последовательностей данных [21]. Согласно этому методу, установление взаимной корреляции между двумя (одноканальными) процессами заключается в вычислении функции взаимной (двухканальной) спектральной плотности мощности, которая представляет собой дискретно-временное преобразование Фурье взаимной корреляционной функции в виде

$$P_{xy}(f) = T \sum_{k=-\infty}^{k=+\infty} r_{xy}[k] \exp(-j \times 2\pi f k T), \quad (2)$$

$$F_{xy}(f) = P_{xy}(f) / \sqrt{P_{xx}(f)} \sqrt{P_{yy}(f)}, \quad (3)$$

где x, y — одноканальные процессы, f — частота, T — интервал времени.

Учитывая (2) и (3) для измерения сходства (как функции частоты) двух сигналов вычисляем квадрат модуля когерентности (КМК) в виде

$$\text{КМК}(f) = |F_{xy}(f)|^2 \quad (4)$$

и фазовый спектр когерентности

$$\theta(f) = \arctg[\text{Im}\{F_{xy}(f)\} / \text{Re}\{F_{xy}(f)\}]. \quad (5)$$

Размер КМК (4) заключен между 0 (для частот, на которых отсутствует когерентность между каналами) и 1 (для частот, на которых каналы полностью когерентны). Фаза когерентности (5) характеризует отставание или опережение по фазе события в канале x по отношению к событию в канале y .

Этим методом нами проведен двухканальный анализ когерентности. При изменении порядка модели в пределах с $IP = 5$ до $IP = 14$ получена устойчивая оценка периода когерентных колебаний в сопоставляемых последовательностях данных DIP и данными о долговременном тренде R .

Установленная когерентность (КМК = 0.86) между вариациями с периодом 35.3 года в данных DIP и R допускает возможность процесса их синхронизации, на изучаемом интервале времени, с опережением колебаний в данных DIP на 6 лет (рис. 8).

Недостаточная информация о механизмах связи внутри земных и внешних процессов создает определенные трудности в построении математической модели параметров ориентации Земли. Этот недостаток компенсируют современные высокоточные наземные и космические наблюдения, которые обеспечивают непрерывный контроль и коррекцию основных параметров модели системы Земля.

При этом на графиках гладких функций, описывающих долговременный нелинейный тренд, появляются особенности с точками возврата при переходе на другой режим колебаний. Кратковре-

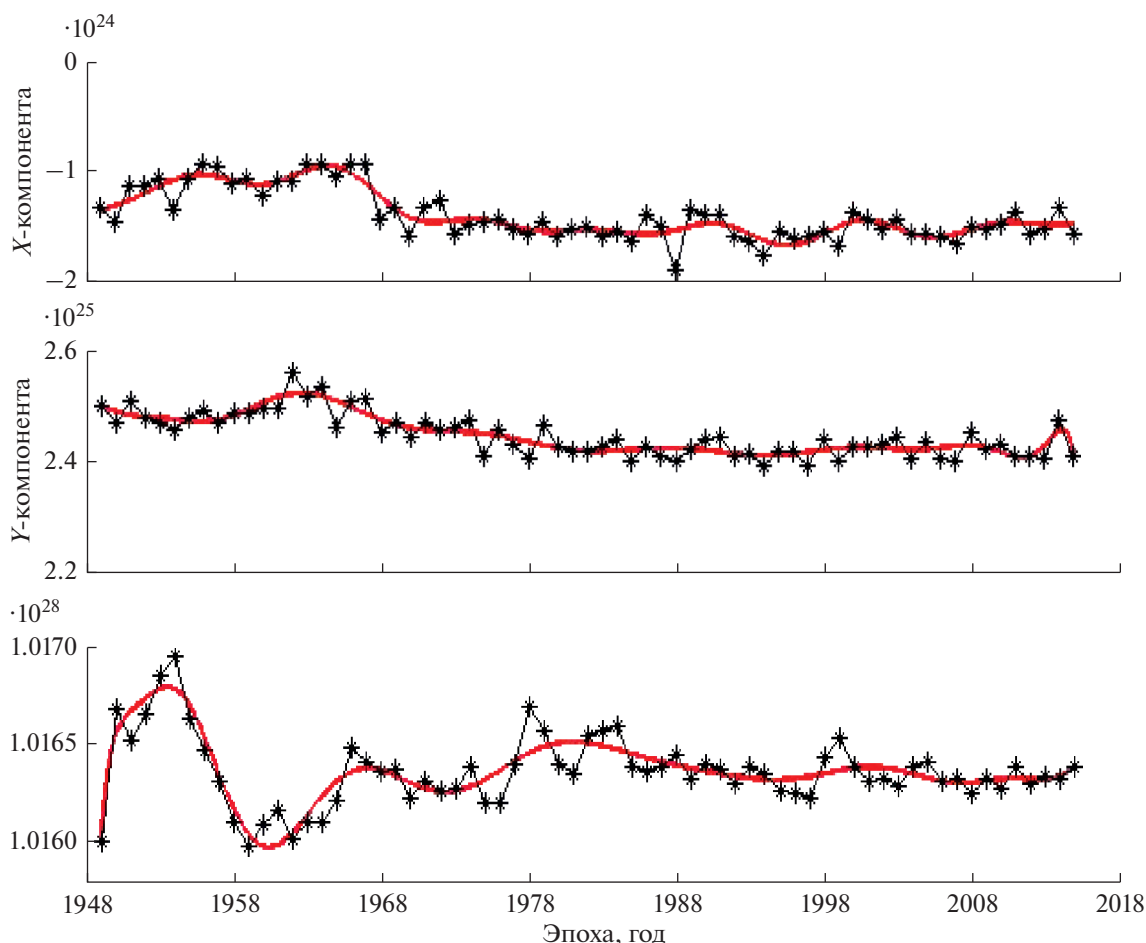


Рис. 7. Графики среднегодовых данных о компонентах X, Y, Z углового момента атмосферы (MassTerm_IB).

менные нерегулярности обнаруживаются в не сглаженных высокоточных среднесуточных наблюдениях параметров движения Северного географического полюса по поверхности Земли и некоторые из них в проекциях на плоскость (x_p, y_p) имеют вид джерков с периодической повторяемостью. Для демонстрации этого утверждения приведем пример.

На рис. 9 изображены графики изменений среднесуточных координат Северного полюса Земли на плоскости с осями x_p (оси абсцисс) и y_p (оси ординат), вычисленные на основе современных высокоточных наблюдений и публикуемые регулярно Международной службой вращения Земли (IERS). Интервал повторяемости демонстрируемых на рис. 9 нерегулярностей составляет 32 г.

Признанный глобальным джерк 1978 г. и локальный джерк 2005 г. по времени появления сопоставимы с приведенными особенностями на рис. 9.

ВЫВОДЫ

Синхронизация колебаний долговременных физических процессов в связанных оболочках

системы Земля—Луна—Солнце при достижении определенного энергетического уровня вызывает кратковременный переход на другой уровень с последующим возвратом на прежний или выходом на другой режим колебаний. Один из таких переходов наблюдается на графиках долговременных трендов смещения Северного географического полюса по поверхности Земли, компонентов X, Y, Z углового момента атмосферы (см. рис. 6, 7). В этом процессе синхронизации происходит наложение близких по частоте колебаний. При достижении порогового значения происходят резонансные события, которые в случае даже слабой нелинейности системы приводят к нетривиальным распределениям энергии. Результаты проведенного нами анализа данных о появлении особенностей на графиках координат смещения по поверхности Земли географического Северного полюса, компонентов углового момента атмосферы и глобальных джерков в геомагнитном поле свидетельствует о возможной синхронизации колебаний в этих процессах.

Доказательство энергетической связи между сопоставляемыми нами событиями носят эмпи-

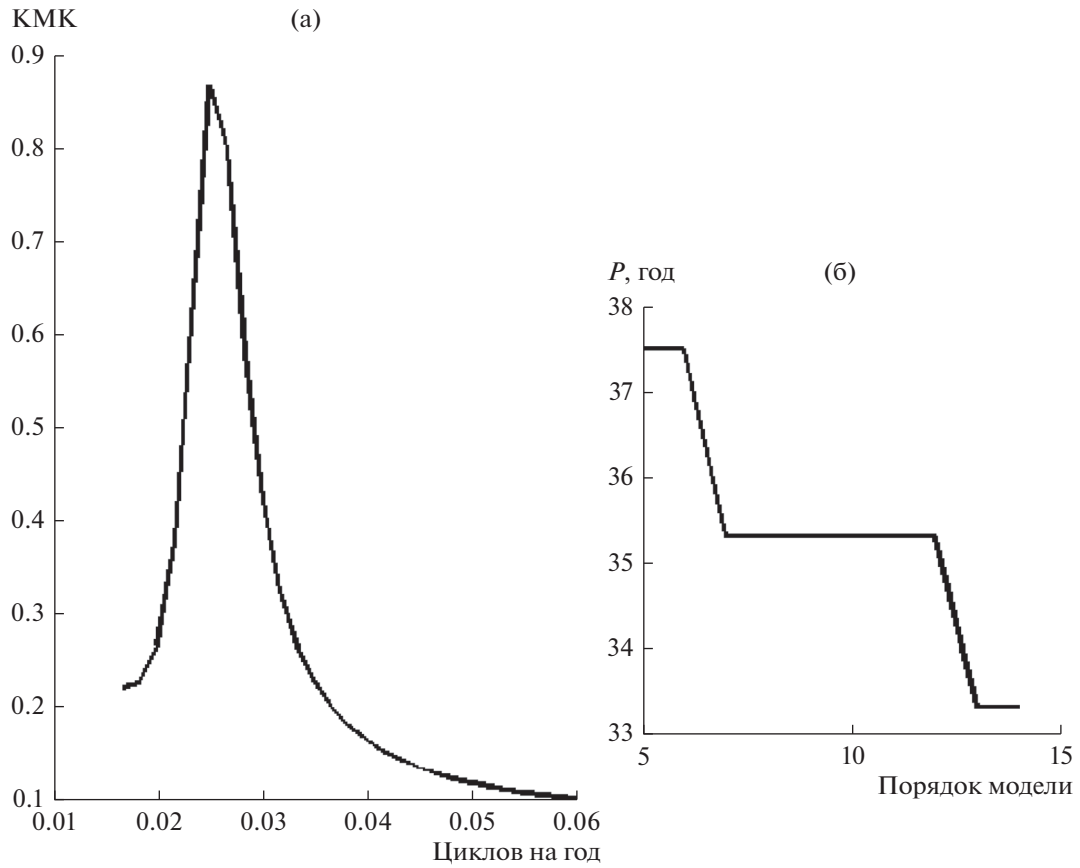


Рис. 8. а – функция КМК; б – величины периодов (P), определяемых в моделях различных порядков (IP).

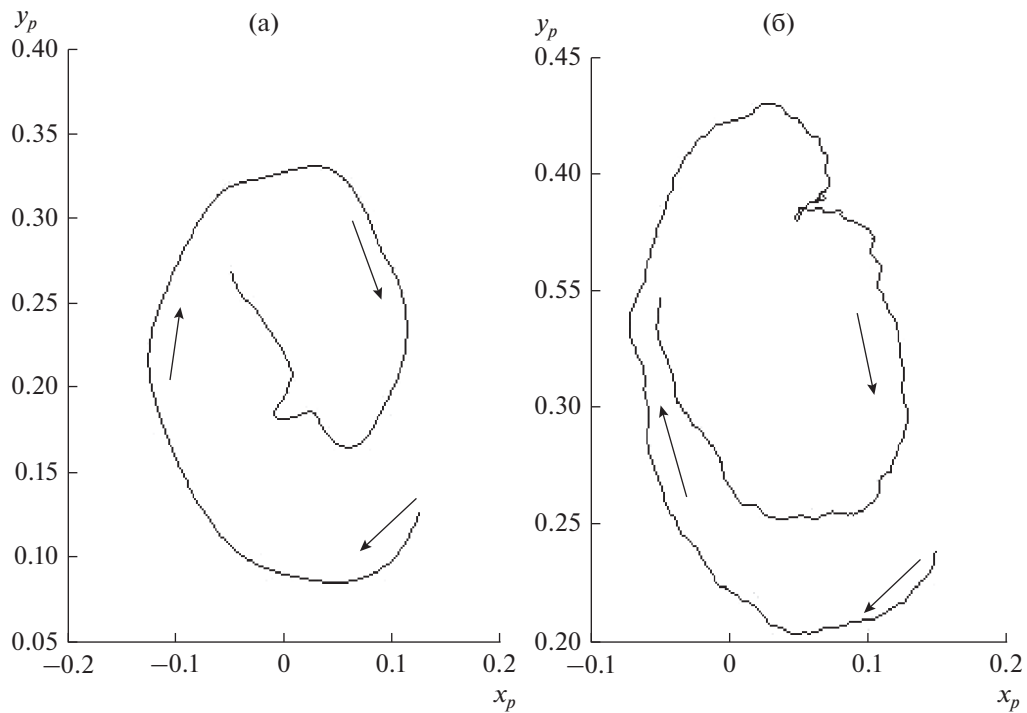


Рис. 9. Особенности изменения суточных координат Северного полюса Земли на интервалах: а – с 1.1.1973 по 31.12.1974; б – с 1.1.2005 по 31.12.2006.

рический характер. Теоретическое обоснование связи глобальных энергетических обменных процессов в различных оболочках системы Земля в настоящее время требует уточнения существующих моделей долговременного движения Земли и векового смещения геомагнитных полюсов на основе современных высокоточных наблюдений. В работе охвачен лишь короткий период глобального процесса и долговременный тренд может быть частью многолетнего цикла.

Долговременное смещение Северного географического полюса по поверхности Земли и изменения вековых вариаций геомагнитного поля сопровождаются появлением особых точек и сопоставимых с ними по времени глобальных джерков в геомагнитном поле. По результатам сопоставления моментов появления особенностей долговременного смещения по поверхности Земли географического Северного полюса, компонентов углового момента атмосферы и появления глобальных джерков в геомагнитном поле, можно предположить о существовании связи глобальных энергетических перестроек в этих процессах на рассматриваемом интервале времени.

Анализ джерков показал, что происхождение глобальных и локальных джерков может иметь разную природу. Сопоставимая с локальным джерком в 2005 г. особенность в среднесуточных данных смещения Северного географического полюса наблюдалась в конце 2005 г. (точка возврата приходится на дату 12.I.2006, рис. 9). Так как в долговременных изменениях координат географического полюса эта точка возврата не просматривается, и джерк в геомагнитном поле был признан локальным, для установления когерентности этих событий нами использовались среднесуточные смещения географического полюса. Что касается джерков в 1991 и в последующие годы, нами не была обнаружена корреляция с особенностями (появление точек возврата) долгопериодического смещения географического полюса по поверхности Земли.

О связи дипольного поля с вращением Земли свидетельствует высокая когерентность ($KMK = 0.86$) между вариациями с периодом 35.3 г. в долговременных смещениях Северного географического полюса относительно условного начала и дипольного момента Земли. Допускается возможность процесса их синхронизации с опережением на 6 лет колебаний в данных об изменении дипольного момента.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках научно-го проекта 075-15-2020-780.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Hide R., Dickey J.O.* Earth's variable rotation // *Science*. 1991. V. 253. P. 629–637.
2. *Dickey J.O., Marcus S.L., de Viron O.* Air Temperature and Anthropogenic Forcing: Insights from the Solid Earth // *J. Climate*. 2011. V. 24. № 2. P. 569–574.
3. *Vondrak J., Ron C.* Earth orientation and its excitations by atmosphere, oceans, and geomagnetic jerks // *Serb. Astron. J.* 2015. V. 191. P. 59–66.
4. *Abarco del R.R., Gambis D., Salstein D.A. et al.* Solar activity and earth rotation variability // *J. Geodyn.* 2003. V. 36. P. 423–443.
5. *Holme R.* Magnetic ringing of the Earth // *Nature*. 2009. V. 459. P. 652–653.
6. *Holme R., de Viron O.* Geomagnetic jerks and a high-resolution length-of-day profile for core studies // *Geophys. J. Int.* 2005. V. 160. P. 435–439.
7. *Holme R., de Viron O.* Characterization and implications of intradecadal variations in length of day // *Nature*. 2013. V. 499. P. 202–204.
8. *Pinheiro K.J., Jackson A., Finlay C.C.* Measurements and uncertainties of the occurrence time of the 1969, 1978, 1991, and 1999 geomagnetic jerks // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2011. V. 12. P. Q10015.
9. *Dmitriev A.V.* On the radiation belt location during the 23rd and 24th solar cycles // *Ann. Geophys.* 2019. V. 37. P. 719–732.
10. *Dmitriev A.V.* Study on the Outer Radiation Belt Location in the 23–24 Solar Cycles // *Challenging Issues on Environment and Earth Science*. 2021. V. 6. P. 1–20.
11. *Shiskin J., Young A.H., Musgrave J.C.* The X-11 Variant of Census Method II Seasonal Adjustment, Technical Paper n. 15, Washington, D.C.: U.S. Bureau of Census, 1967.
12. *Vondrak J., Ron C., Pesek I., Ceppek A.* New global solution of Earth orientation parameters from optical astrometry in 1900–1990 // *Astron. Astrophys.* 1995. V. 297. P. 899–906.
13. *Fedorov E.P., Korsun A.A., Mayor S.P. et al.* Dvizhenie polyusa Zemli s 1890.0 po 1969.0. Kiev: Naukova Dumka, 1972.
14. *Vondrak J., Ron C., Stefka V.* Earth orientation parameters based on EOC-4 astrometric catalog // *Acta Geodyn. Geomat.* 2010. V. 7. № 3. P. 245–251.
15. *Schindelegger M., Böhm J., Salstein D., Schuh H.* High-resolution atmospheric angular momentum functions related to Earth rotation parameters during CONT08 // *J. Geodesy*. 2011. V. 85. P. 425–433.
16. *Thébault E., Finlay C.C., Beggan C.D. et al.* International Geomagnetic Reference Field: the twelfth generation // *Earth Planets and Space*. 2015. V. 67. P. 79.
17. *Yang S., Odah H., Shaw J.* Variations in the geomagnetic dipole moment over the last 12000 years // *Geophysical J. International*. 2000. V. 140. P. 158–162.
18. *Fournier A., Aubert J., Thébaud E.* A candidate secular variation model for IGRF-12 based on Swarm data and inverse geodynamo modelling // *Earth Planets and Space*. 2015. V. 67. P. 81.
19. *Courillot V., le Mouél J.L.* Geomagnetic secular variation impulses // *Nature*. 1984. V. 311. P. 709–716.
20. *Arnold V.I.* Wave front evolution and equivariant Morse lemma // *Commun. Pure Appl. Math.* 1976. V. 29. № 6. P. 557–582.
21. *Марш С.Л. мл.* Цифровой спектральный анализ и его приложения. М.: Мир, 1990.